

# 紙飛行機デザインプロジェクト

## —自由形状をした滑空機の対話的な最適化—

梅谷信行（オートデスク研究所）

### 自由形状の紙飛行機設計

このたび編集委員会特別企画として、ユニティ・テクノロジー・ジャパンとの共同で『手投げ飛行機組み立てキット』をデザインし、PDFで公開しました<sup>☆1</sup>。これは、SIGGRAPHをはじめとする学会などでも身近になったフリー素材であるユニティちゃんを自由形状のための手投げ滑空機設計支援システム<sup>1)</sup>を使って設計したものです。一般的に滑空機の空気力学的な特性はその形状や重心位置によって決まります。しかし、形状がどのように飛行に影響を与えるかという関係は自明ではなく、このような自由形状の滑空機の設計は初心者には困難でした。

そこで、我々は機体形状と空気力学的な力の関係を調べるために機械学習に基づく手法を提案しました。具体的には、学習データとして単純な形をした滑空機をいくつか作成し、それらの実際の飛行の軌跡に、数値計算された軌跡が一致するように、空気力学的な力を予測するモデルの変数を学習させるというものです。学習によって得られた空気力学モデルは、非常に単純であり、任意形状の滑空機について実時間で飛行軌跡を計算することが可能になりました(図-1)。またユーザの対話的な形状編集に、滑空機が長距離飛行するように翼の位置と向きを実時間で最適化することも可能になりました。

### 機械学習による空力設計

#### ● 空気力学モデル

飛行軌跡の実時間での計算には、いかに簡単な空気力学モデルを作成できるかが鍵となります。翼は、揚力と抗力とピッチングモーメント(機首を上げ下げする方向の回転モーメント)の3つの力を発生させま

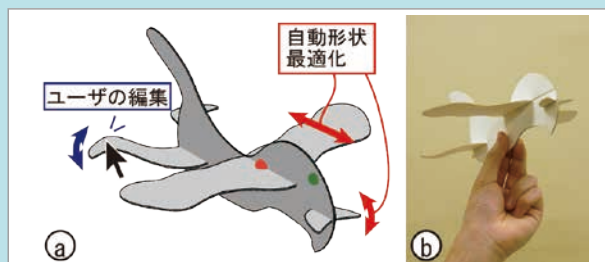


図-1 (a) ユーザの形状編集集中の、自動最適化 (b) 設計された自由形状の滑空機 (15m 程度飛行)

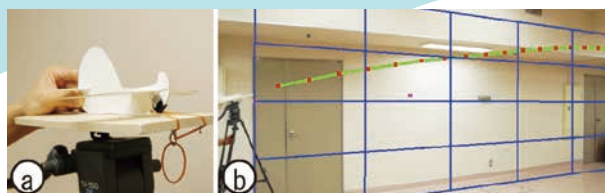


図-2 (a) 滑空機の発射台の様子. (b) 発射された滑空機の飛行軌跡の例

す。これらの力はレイノルズのスケール則から対気速度の二乗に比例し、翼の面積に比例することが知られています<sup>2)</sup>。また、これらの力は翼の形状によっても変化するのですが、翼の二次元形状を軸方向に台形の短冊状に分割することで、少ない変数の集合で翼の形状を表現しています。それぞれの翼要素から発生する3つの力(揚力・抗力・ピッチングモーメント)をそれぞれ足し合わせることで得られる近似的な空気力を元に、滑空機の飛行軌跡を計算することができます。

#### ● 空気力学モデルの推定

空気力学モデルを作成するために20個の異なる単純な形をした滑空機を実際に作成して、それらを計113回飛ばすことによって得られた軌跡を用いました。発射台(図-2(a))からゴムの弾性を用いて発射された滑空機を、側面から撮影された動画を分析して飛行軌跡を測定しました(図-2(b))。ある翼要素が発生する3つの力(揚力・抗力・ピッチングモーメント)は、翼要素の形、対気速度、翼の迎え角などの入力変数によって変化します。3つの空気力と入力変数の対応を学習する方法として、放射基底関数ネットワークを用いました。

☆1 <http://www.ipsj.or.jp/magazine/kamihikouki.html>

## ● 長距離飛行のための形状最適化

よく飛ぶ滑空機を簡単に設計できるようにするために、計算機が形状を自動最適化してくれるようにしました。滑空機がよく飛ぶ条件として、3つの条件を考えました。第1の条件はピッチの安定性で、機首が上がり過ぎたときに機首を下げる方向にピッチングモーメントが働くような、迎え角のバランスです。第2の条件は垂直方向の力の釣り合いで、滑空機に働く揚力と重力がなるべく同じになって、滑空機がなるべく水平に飛ぶというものです。最後の条件は滑空機に働く抗力が揚力と比べてできるだけ小さいというもので、滑空機の飛行速度の減衰が小さくなります。これらの条件を数値化して、最急降下法という方法を用いて最適化しました。

計の最中で、実時間で滑空機の飛行軌跡予測と形状最適化が可能になりました。空気力学モデルを得るための従来方法は、風洞実験や大規模な計算流体力学などの多大な設備や労力を要するものでしたが、機械学習を用いることで設計に有意義な空気力学モデルを安価に得られることを実証しました。同様な手法を応用して、風やタービンなどの、流体力学を考慮することが必要なさまざまな人工物に対しても、対話的な設計を可能にすることが将来の課題です。

### 参考文献

- 1) Umetani, N., Koyama, Y., Schmidt, R. and Igarashi, T. : Pteromys : Interactive Design and Optimization of Free-formed Free-flight Model Airplanes, ACM Transaction on Graphics, Vol.33, No.4 (July 2014).
- 2) 小林昭夫：紙ヒコーキで知る飛行の原理，講談社ブルーバックス（1988）。

（2015年11月28日受付）

## 対話的な流体機械設計に向けて

実際の滑空機の飛行軌跡から機械学習することにより得られた空気力学モデルを使って、対話的な設

梅谷信行 nobuyuki.umetani@autodesk.com

2014年東京大学コンピュータ科学専攻博士課程卒業。現在、カナダのAutodesk研究所において、計算機を用いた対話的な設計環境に関する研究に従事。

### ユニティちゃんってなに？

ユニティちゃん（大鳥こはく）は「コーゲン・シティ」という港町に住む、身体を動かすのが大好きな高校生。将来の夢は映画やゲームのアクション俳優！ ちょっと流されやすい性格が玉にキズだけど、やると決めたら何事も持ち前の活発さを発揮して全力で挑戦する、素直で真面目な子です。

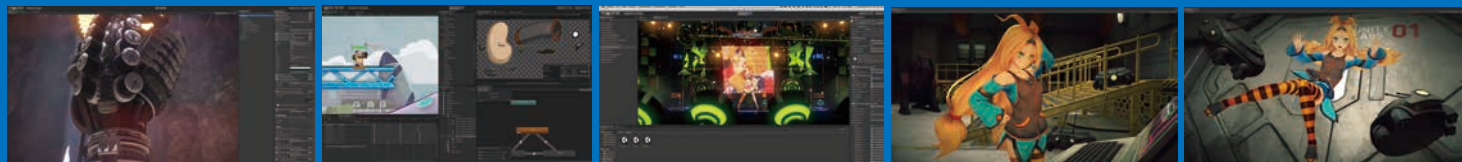
『ユニティちゃん』はゲームやインタラクティブなアプリケーションを開発するためのソフトウェア『Unity』を提供するユニティ・テクノロジーズ・ジャパンが送る元気いっぱいオリジナルキャラクタです。Unityの持つ「だれでもゲームを作れるようにする」という目標を、もっと気軽に実現したいという思いから誕生しました。ユニティちゃんの公式Webサイト（unity-chan.com）からは3Dモデルや2Dグラフィック、ボイスデータや歌、ダンスや世界観設定など、さまざまなデータを無料でダウンロードできます。

ユニティちゃんは条件のゆるいライセンスで提供されており、ファン活動の2次創作のほか、製品、研究、教育等への利用が無償で行えるため、ゲームやアプリでの利用のみならず、今ではSIGGRAPHやCESなど、世界中で幅広く活躍しています。

あなたもユニティちゃんとUnityでゲーム開発に挑戦してみませんか？



<http://unity3d.com>

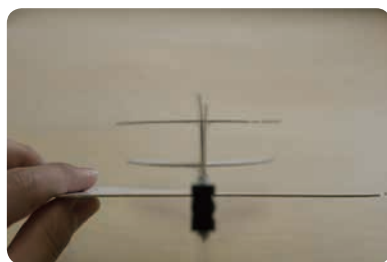




# ユニティちゃん紙飛行機の 作り方・飛ばし方

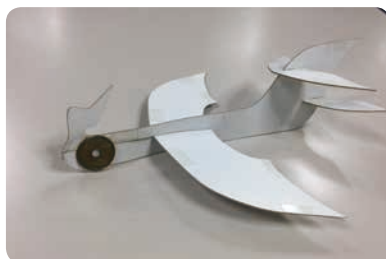
**1** 厚紙（一般的には「ボール紙」「板紙」「工作用紙」などと呼ばれる紙）を用意します。スリット幅が1mmで設計されていますので、厚みが0.8～1.0mm推奨です。実験では、『NEW DV (640×940) 36kg (550g/m<sup>2</sup>)』、『サンカード K判 25kg (420g/m<sup>2</sup>)』（サンカードの場合には紙の厚みを出すために2枚重ね）で行いました。この厚紙を中央にして、両面に次のページにあるユニティちゃん飛行機の図柄を張り合わせます<sup>☆1</sup>。のりでもセロハンテープでも可。※スリット部分は特に丁寧に切ることが垂直に作りよく飛ばすためのコツです。定規をカッターに当ててまっすぐになるように切ってください。

**2** 主翼を胴体に挟み込み、垂直にセロハンテープで固定します。ここできれいに垂直に固定することが大事です。プラモデルで使われるような垂直固定具（L形棒）を使うこともあります。



▲図-1 垂直に固定します。（左）主翼を胴体に挟み込みます。（中央）正面から見て垂直になっているか確認してください。（右）垂直固定具（L形棒）などを使うと垂直に固定しやすくなります。

**3** 機首に3gほどの重りをつけます。身近なものでは、1円玉2枚を1gほどのクリップで挟む（図-2左図）、5円玉をセロハンテープで固定する（図-2右図）、など。



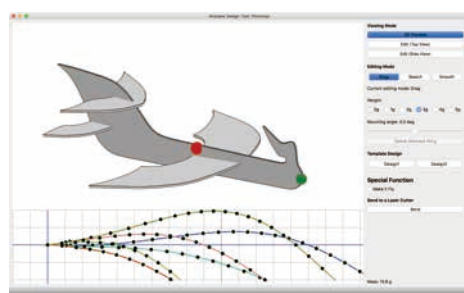
◀図-2  
（左）1円玉2枚を1gのクリップで挟む、  
（右）5円玉1枚をセロハンテープで固定する。

**4** 水平に初速をつけて飛ばします。システムを使ったシミュレーションでは初速は7, 9, 11 [m/s] の3種類で実験しました。一般に紙飛行機を飛ばす感覚よりも少し速いと思いますので、以下のビデオを参考にしてください。

<参考ビデオ>

<https://youtu.be/-KJUVJAUY8o>

<https://youtu.be/PjrrEysD5go>



◀図-3  
ユニティちゃん飛行機のシミュレーション。重りの位置をずらしたときや重りの重さを変えたときの結果をシミュレーション可能。

※飛行距離や軌跡は、1) 初速の向き、2) 初速の速さ、3) 機首の重り、4) 重りをつける位置、などさまざまな要素によって変わってきます。たとえば、図-2の右図での5円玉は機首から5mmの位置につける場合と、10mmの位置につける場合とで飛び方が異なります。ぜひいろいろ変えて実験してみてください。

☆1 こちらは同じものが Web (<http://www.ipsj.or.jp/magazine/kamihikouki.html>) からダウンロード可能です。

